

广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析

姜春^{1,3,4}, 吴志峰^{2*}, 程炯³, 钱乐祥²

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 3. 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 理解土地利用/覆盖变化对植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的影响对于全球碳循环和粮食安全具有重要意义。论文采用优化的CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型估算广东省2000、2005和2010年NPP, 分析NPP的空间格局和土地覆盖的时空动态, 研究土地覆盖变化对NPP的影响。结果表明: 1) 广东省NPP空间分布不均, 形成一系列高值区和低值区; 总体上是粤中区最高, 珠三角区最低。2) 2000—2010年广东省土地覆盖变化程度增强, 城市用地和耕地变化最大, 主要集中在珠三角区和粤中区。3) 在气候变化条件下, 以城市扩张为主导的广东省土地覆盖类型变化整体上造成NPP的损失, 损失量主要来自林地和耕地向低生产力土地覆盖类型的转换, 尤其是被城市用地占用; 不同生态区NPP损失差异显著, 珠三角区和粤中区NPP损失较为严重; 2005—2010年珠三角区NPP损失量有所降低, 其他生态区均有所增加, 体现了城市扩张对NPP影响的复杂性。

关键词: 土地利用/覆盖变化; 城市扩张; 净初级生产力(NPP); CASA; 广东省

中图分类号: F301.24; Q948 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2016)06-0961-12

DOI: 10.11849/zrzyxb.20150499

土地利用/覆盖变化(LUCC)与陆地生态系统碳循环已成为全球变化研究的热点。LUCC通过转化地表景观而改变陆地生态系统的组成和结构, 进而影响生态系统的功能和过程^[1-2]。DeFries等^[3]认为, 在过去两个世纪, LUCC造成地球生态系统的潜在光合作用能力下降了5%。随着城市化进程的加剧, 各种非城市用地快速转化为城市用地, 其中侵占最多的就是高生产力的林地和肥沃的耕地, 不仅直接导致植被和土壤固碳能力的丧失、碳循环功能的下降, 而且给自然资源和粮食安全带来了巨大压力^[3-6]。

作为地表碳循环的重要组成部分, 植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指通过光合作用把太阳能转化的全部有机物总量扣除同期内植物自养呼吸后的剩余部分, 它是地球上异养生物所需食物的初级来源^[7]。NPP不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力, 表征陆地生态系统的质量状况, 而且是判定陆地生态系统碳源/汇和调节生态过程的敏感性指示因子^[8]。气候干扰和人类活动是NPP变化的两种主要驱动力, 气候通过改变环境条件在植被的生理结构、过程等方面控制NPP的形成; 人

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-10-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401191, 31170445); 广州市属高校科研项目(10A004)。[Foundation items: National Natural Science Foundation of China, No. 41401191 and 31170445; Scientific Research Project of Guangzhou Local University, No. 10A004.]

第一作者简介: 姜春(1984-), 女, 河南周口人, 博士生, 主要从事环境遥感和GIS应用研究。E-mail: jiangc-hun@soil.gd.cn

*通信作者简介: 吴志峰(1969-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 教授, 博士生导师, 中国自然资源学会会员(S300000919M), 主要从事景观生态、地理学、环境遥感与GIS应用科研与教学工作。E-mail: gzuwzf@163.com

复杂, 参数较多且难以获取; 以CASA模型为代表的参数模型充分考虑了环境条件和植被自身的生理生态特征, 许多植被参数可直接利用遥感数据获取, 并可获得NPP的年内变化, 目前在国家和省域尺度上应用较多, 主要通过优化模型中的各参量来提高模型的估算精度^[9]。本文选择CASA模型估算广东省植被NPP, 模型所需数据源主要包括植被分类数据、基于遥感的NDVI数据和气象数据。

以土地覆盖分类数据为基础, 结合中国植被功能型图和广东省林业清查资料, 对植被类型进行重新记录和合并处理, 生成新的植被分类数据(常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶针叶林、混交林、灌木林、草地、耕地和其他用地类型)。其中, 土地覆盖分类数据是基于碳收支的FAO LCCS分类系统, 采用2000、2005和2010年的Landsat TM/ETM遥感影像和面向对象的解译方法而获得。植被功能型图来源于寒区旱区科学数据中心^[21]。

综合利用来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的中国MODIS NDVI每天产品(MODNDID)和来自NASA的MODIS NDVI 16 d合成产品(MOD13Q1), 分辨率均为250 m, 时间为2000、2005和2010年。采用最大值合成法(Maximum Value Composite, MVC)得到3个年份的逐月NDVI最大合成值。

气象数据包括月太阳总辐射、月日照时数、月平均气温和月总降雨量, 来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>), 时间为2000、2005和2010年。选择包含华中和华南地区的第五区地理气候带的22个辐射站点数据^[22]和广东省及周边的65个气象站点作为基础数据, 在前人对太阳辐射、气温和降水空间分布模拟研究的基础上^[23-25], 分别建立太阳辐射与其影响因子(纬度、海拔高度和月日照时数)、气温和降水与其影响因子(纬度、经度和海拔高度)之间的多元非线性回归模型, 从而获取各气象因子的栅格空间分布。

2.1.2 生态功能分区数据

生态功能分区数据来源于中国生态系统评估与生态安全数据库(<http://www.ecosystem.csdb.cn>)。根据生态系统类型和地理特征等自然条件, 广东省划分为4个生态区: 南岭山地丘陵常绿阔叶林生态区(南岭区)、粤中部山地丘陵常绿阔叶林生态区(粤中区)、珠江三角洲城镇与城郊农业生态区(珠三角区)和粤南部热带季雨林与雨林生态区(粤南区)。

2.2 基于CASA模型的植被NPP的估算

采用基于遥感和光能利用率的CASA模型估算广东省NPP, CASA模型主要由植被所吸收的光合有效辐射[APAR, 单位为MJ/(m²·月)]与实际光能利用率(ϵ , 单位为gC/MJ)两个变量来确定^[26], 计算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中: $NPP(x, t)$ 表示植被在像元 x 位置 t 月的净初级生产力[g C/(m²·月)]。

2.2.1 APAR的确定

APAR取决于太阳总辐射和植被的吸收能力, 由光合有效辐射[PAR, 单位为MJ/(m²·月)]和植被对太阳有效辐射的吸收比例(FPAR)来确定, 而光合有效辐射是太阳总辐射量[SOL, 单位为MJ/(m²·月)]与植被所能利用的太阳有效辐射(有效辐射波长大概为0.4~0.7 μm)占太阳总辐射的比例(通常为常数0.5)的乘积^[26], 表达式如下:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times 0.5 \times FPAR(x, t) \quad (2)$$

FPAR 取决于植被类型和植被覆盖状况。研究表明,在一定范围内, *FPAR* 与 *NDVI* 和比值植被指数 (*SR*) 之间均存在着线性关系,实现过程见参考文献[9]。

2.2.2 ε 的确定

光能利用率指植被把所吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率。*Potter* 等^[26]认为在理想条件下植被具有最大光能利用率,而在现实条件下主要受温度和水分的影响,公式为:

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中: $T_{\varepsilon}(x, t)$ 和 $W_{\varepsilon}(x, t)$ 分别表示植被在像元 x 位置 t 月的温度胁迫因子和水分胁迫因子,具体实现参考文献[9,27-28], ε_{\max} 为最大光能利用率 (g C/MJ)。

在目前的科研条件下, ε_{\max} 还无法通过试验获得,只能通过模拟求取,已有学者^[17,27]通过建立各植被类型 *NPP* 实测值与模拟值之间的误差函数,根据误差最小的原则模拟出各植被类型的 ε_{\max} ,但需要预先知道研究区相同时段的 *NPP* 实测数据。国内研究应用最多的 *NPP* 实测数据是来自中国林业部 1989—1993 年的林业普查资料^[29],位于广东省内的站点仅有 15 个,且植被属性数据中缺少地上净初级生产力,该数据并不适合本文 ε_{\max} 的模拟。分别采用 *Zhu* 等^[30]和 *Pei* 等^[17]对各植被类型 ε_{\max} 的估算结果,将估算出的结果与借助林业清查资料和生物量估计回归方程估算的结果进行对比分析,结果表明:利用 *Zhu* 等^[30]和 *Pei* 等^[17]的 ε_{\max} 平均值估算的结果与林业资料估算出的 *NPP* 更接近,因此,森林类型的 ε_{\max} 采用 *Zhu* 等^[30]和 *Pei* 等^[17]估算的 ε_{\max} 平均值。农作物产量是一定区域内农作物在生长季节内的 *NPP* 的一部分,两者之间存在一个有效产量转换关系^[31],故利用《广东农村统计年鉴》中农作物产量转化的 *NPP* 作为实测 *NPP*,然后根据误差函数公式模拟出广东省耕地 2000、2005 和 2010 年的 ε_{\max} 分别为 0.455、0.505 和 0.546。

3 结果与分析

3.1 广东省 *NPP* 的模拟结果分析

3.1.1 *NPP* 模拟结果对比

对模拟结果进行验证和比较分析是模型模拟研究中至关重要的一步,一般采用与实测值和其他模型估算结果对比分析的方法。广东省近年的 *NPP* 实测资料极少,借助来自广东省统计年鉴的林业生物量和农作物产量估算的 2000、2005 和 2010 年林地与耕地年均 *NPP* 可作为 *NPP* 实测值; *Ni* 等^[29]得到的是 1989—1993 年中国林业部 690 个观测点的实测值。也有一些学者利用 *NPP* 估算模型对我国陆地生态系统进行了估算^[19,32-34],而对广东省 *NPP* 的研究多采用现有的 *NPP* 数据产品^[35-36]或者基于 *CASA* 模型对 *NPP* 进行估算^[37]。基于此,比较分析了本文不同植被类型的 3 a *NPP* 平均值与广东省和全国的 *NPP* 模拟平均值(表 1)。由表 1 可知:不同模型模拟的各植被类型间 *NPP* 均存在一定的差异,本文林地和耕地 *NPP* 均值略高于统计数据估算值;常绿阔叶林和落叶阔叶林的 *NPP* 均值低于 *Ni* 等^[29]的研究,其他植被类型均高于或与 *Ni* 等^[29]差距不大,主要归因于遥感模拟值与实测值之间的尺度差异。与其他研究结果相比,本文的模拟结果整体上处于中上水平,与同期的 *MOD17A3* 值较为接近,这种差异可能是由模型本身、数据来源、研究区域以及植被分

表1 本文模拟的不同植被类型3 a NPP均值与其他研究模拟的NPP均值的比较

Table 1 Comparison of annual mean NPP simulated in this paper with that of other researches based on vegetation types (g C·m⁻²·a⁻¹)

植被类型	广东省				中国				
	本文模型	统计年鉴 ^①	MOD17A3 ^②	罗艳和王春林 ^[37]	实测值 ^[29,38]	朴世龙 ^[32]	刘明亮 ^[33]	陶波 ^[34]	朱文泉等 ^[9]
常绿阔叶林	833.06		721.86		1 016.50	525.00	945.00	721.00	985.80
常绿针叶林	519.34		696.00		395.50	354.00	587.00	515.00	367.10
落叶阔叶林	533.49	709.53	517.07	763.00	671.80	304.00	928.00	517.60	642.90
落叶针叶林	467.06		381.14		490.00	432.00	585.00	379.10	438.80
混交林	744.70		739.21		-	-	-	-	-
灌木林	470.04		636.31		364.00	283.00	-	272.00	367.70
草地	524.25	-	602.72	617.31	230.60	-	271.00	414.60	226.20
耕地	534.74	505.83	538.75	575.41	532.90	216.00	-	648.80	426.50
城市用地	384.04	-	480.84	-	-	-	-	-	-
湿地	395.18	-	438.22	-	-	-	-	-	-
未利用地	514.47	-	629.54	-	-	-	-	-	-

注: ①来自统计年鉴中的统计数据估算的NPP; ②指MODIS NPP产品。

类标准和精度等不同造成的^[9]。城市用地、湿地和未利用地的植被覆盖度一般低于5%，原则上NPP应该为0，但由于遥感数据本身空间分辨率所限，大部分像元都是混有植被和其他用地类型的混合像元，尤其是广东省，城市绿化率较高，多数植被四季常青，山区县村镇建设用地分散，基塘和沼泽等湿地类型均有水生植物和周边植被存在，因此，实际模拟出的结果中NPP为0的像元很少，仅存在于面积较大的河流、湖泊或者建筑密度较高的中心城区。

3.1.2 NPP的空间格局

从2000、2005和2010年广东省年均NPP的空间分布(图2)可看出，NPP空间分布不均，形成一系列的高值区和低值区，区域差异显著，总体上是粤中区最高，其次是粤南区和南岭区，珠三角区最低。粤中区分布范围较广，有莲花山、罗浮山、云雾山和云开大山等山地林区，植被覆盖度高且植被生长状况良好，具有较高的NPP值。粤南区位于雷州半岛，是广东省重要的农耕区，耕地面积占本区总面积的40%以上，耕作制度属于一年两熟或三熟，受农耕活动中灌溉、施肥和田间管理等活动的影响，该区拥有较高的耕地NPP^[35]。南岭区位于粤北山地丘陵区，植被覆盖度高达95%以上，2000年平均NPP值在所有区域中最高，虽然2010年平均NPP值低于粤中区和粤南区，但由于该区人为干扰强度不大，自然植被保存较好，3 a平均NPP值仍然较高。珠三角区位于环珠江口区域，该区域受人类活动影响最频繁，城市化程度最高，植被覆盖度在50%以下，年均NPP值较低。NPP是局部主导气候、人为因素和其他影响因子共同作用的结果，气候可通过树龄和林分生物量间接影响NPP^[39]，在气候这种大背景下，人为因素对NPP的变化起干扰作用，使得NPP具有较强的空间异质性^[9]，这主要体现在受人类活动干扰最强烈的珠三角区。

3.2 广东省土地利用/覆盖时空动态

由广东省土地覆盖变化面积和比例(表2)可知，城市用地和耕地变化最大，

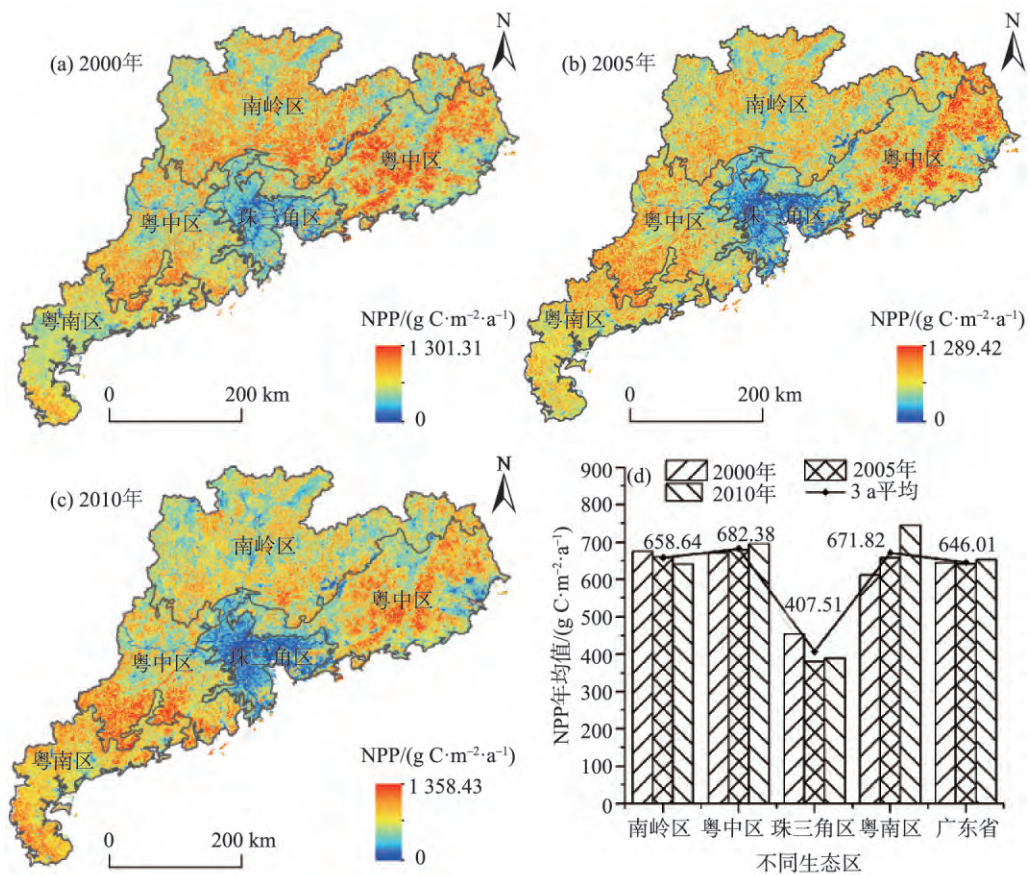


图2 2000、2005和2010年广东省年均NPP的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of annual mean NPP in Guangdong Province in 2000, 2005 and 2010

表2 2000—2010年广东省土地覆盖变化面积和比例

Table 2 Areas and percentage of land cover change in Guangdong Province during 2000—2010

时间	变化量	林地	耕地	城市用地	湿地	草地	未利用地	总变化
2000—2005年	面积/km ²	-165.85	-1 154.03	1 179.69	10.30	25.25	108.62	2 643.75
	比例/%	-6.27	-43.65	44.62	0.39	0.96	4.11	1.52
2005—2010年	面积/km ²	-329.49	-713.84	1 572.03	-153.80	-49.08	-322.26	3 140.51
	比例/%	-10.49	-22.73	50.06	-4.90	-1.56	-10.26	1.80

注：数值前“-”代表减少；总变化表示所有土地覆盖类型变化之和，不区分增加和减少。

2000—2005年，广东省新增城市用地面积1 179.69 km²；耕地面积减少1 154.03 km²；同期林地减少165.85 km²，其他土地覆盖类型略有不同程度增加。2005—2010年，土地变化总面积由2000—2005年的2 643.75 km²增加到3 140.51 km²；新增城市用地面积增加到1 572.03 km²；耕地面积减少比例降低到22.73%；有接近10.5%的林地和未利用地面积减少，减少比例较2000—2005年有所增高，湿地和草地面积均有所减少。可见，广东省土地覆盖变化程度整体上增强。

广东省土地覆盖变化具有区域差异性（图3），珠三角区和粤中区土地变化较大。2000—2005年，珠三角区和粤中区土地变化总面积分别为1 386.60和1 083.76 km²；南岭

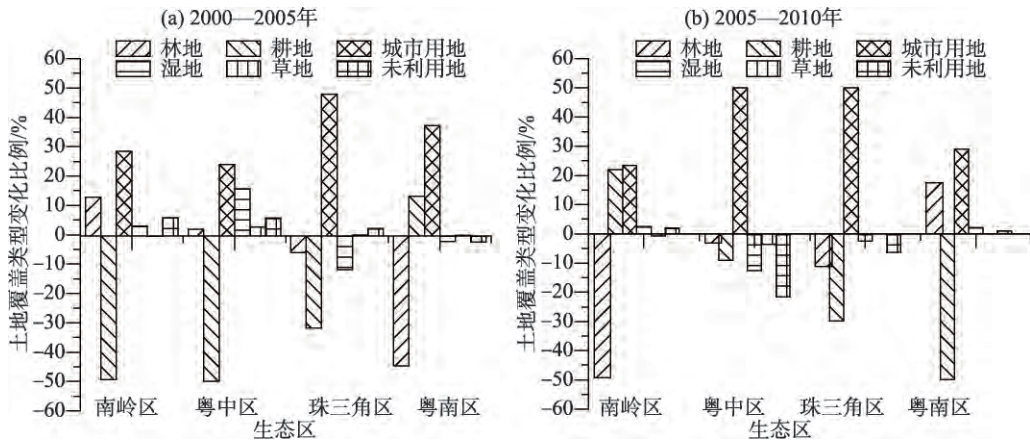


图3 2000—2010年广东省不同生态区土地覆盖变化情况

Fig. 3 Land cover change in different ecological regions of Guangdong Province during 2000-2010

区和粤南区均为400 km²左右。珠三角区是一个快速城市化地区，其新增城市用地面积占全省新增城市用地总面积的56.27%，其中一半以上来源于对耕地的侵占。2005—2010年，粤中区土地变化总面积较2000—2005年增加了14.00%，新增城市用地面积增加了1.38倍；珠三角区土地变化总面积减少了14.27%，新增城市用地面积减少了10.44%；粤南区和南岭区土地变化总面积分别增加了1.14倍和34.10%。究其原因，粤中区的新增城市用地多位于珠三角区外缘，主要受城市扩张的影响；粤中区耕地面积减少量显著下降，南岭区耕地面积增加，主要归因于国家农田保护政策和山区县土地整治政策的实施。

3.3 LUCC对NPP的影响分析

表3为2000—2010年广东省LUCC过程总NPP的变化情况，是通过土地覆盖类型转化过程中的平均NPP变化值进行面积加权得到，总NPP变化(Tg C, 1 Tg C=10¹² g C)比平均NPP(Tg C·m⁻²)更能深刻地反映土地覆盖类型转化引起的NPP的增加/损失。LUCC对NPP的影响是两面性的：一方面，具有较高植被生产力的土地覆盖类型向城市用地等植被生产力较低的土地覆盖类型转换造成NPP的损失；另一方面，城市用地、湿地和未利用地等具有较低植被生产力的土地覆盖类型向林地和耕地等植被生产力较高的土地覆盖类型转换带来NPP的增加。

由表3可知，2000—2005年间，在气候变化条件下，土地覆盖类型不变部分整体上带来了NPP的损失，总损失量为0.19 Tg C；在气候、土地覆盖类型变化和其他因子共同作用下，NPP总增加量为0.18 Tg C，NPP总损失量为0.38 Tg C，NPP净损失量(增加量-损失量)为0.20 Tg C。2005—2010年间，土地覆盖类型不变部分整体上带来了NPP的增加，总增加量为1.95 Tg C；由气候和土地覆盖类型变化带来的NPP总增加量和总损失量分别为0.18和0.19 Tg C，NPP净损失量为0.01 Tg C。与2000—2005年相比，NPP净损失量降低较多。不考虑土地覆盖类型不变部分，NPP增加量主要来自其他用地类型向林地的转换，受退耕还林和封山育林等政策实施的影响，2000—2005和2005—2010年分别有95.48%和92.86%的增加量来自耕地和未利用地向林地的转换，但同时耕地面积减少也造成了耕地产能的下降。NPP损失量主要来自林地和耕地向低植被生产力土地覆盖类型的转换，2000—2005年，林地和耕地转换造成的损失量和占同期总损失量的

表3 2000—2010年广东省LUCC过程NPP的变化值

Table 3 The change of NPP values corresponding with land cover change in Guangdong Province during 2000–2010 (Tg C)

2005年	2000年						行总变化
	林地	耕地	城市用地	湿地	草地	未利用地	
林地	1.585 7	0.130 1	-0.000 2	0.003 4	0.004 8	0.044 0	0.182 1
耕地	-0.078 1	-0.557 5	-0.000 8	-0.008 9	0.000 1	-0.000 6	-0.088 2
城市用地	-0.049 4	-0.079 4	-0.709 8	-0.022 0		-0.001 1	-0.152 0
湿地	-0.005 5	-0.026 7		-0.482 1		-0.000 5	-0.032 6
草地	-0.001 4	-0.000 3		0.000 01	0.008 4		-0.001 7
未利用地	-0.097 8	-0.007 6	-0.001 7	-0.001 1		-0.035 7	-0.108 2
列总变化	-0.232 2	0.016 1	-0.002 7	-0.028 5	0.004 8	0.041 8	-0.200 6
2010年	2005年						行总变化
	林地	耕地	城市用地	湿地	草地	未利用地	
林地	0.999 7	0.085 5		0.000 9	0.000 4	0.079 9	0.166 7
耕地	-0.034 0	0.939 1		0.007 0		0.001 2	-0.025 8
城市用地	-0.071 9	-0.026 1	0.001 3	-0.004 3	-0.000 1	0.002 4	-0.100 0
湿地	-0.004 5	-0.003 5		0.017 8		0.000 4	-0.007 6
草地	-0.001 5				0.001 2	0.000 3	-0.001 1
未利用地	-0.040 4	-0.000 2		-0.000 1	-0.000 3	-0.006 2	-0.040 9
列总变化	-0.152 3	0.055 7		0.003 6	0.000 1	0.084 2	-0.008 8

注：“行总变化”指研究初期其他土地覆盖类型转化为研究末期某种土地覆盖类型过程NPP的变化值之和，“列总变化”指初期某种土地覆盖类型转化为末期其他土地覆盖类型过程NPP的变化值之和，两者均不包括不变土地覆盖类型对应的NPP变化值。数值前的“-”代表NPP损失；空值代表无数值或数值很小。

90.39%，2005—2010年增加到97.49%。

城市化是引起以林地和耕地为代表的植被景观转换的一个主要原因，作为城市化过程中的主要土地发展形式，城市扩张使得各种非城市用地快速转化为城市用地，由此造成了NPP的损失。本研究中，2000—2005年，非城市用地向城市用地转换造成的NPP损失量占同期NPP总损失量的39.67%；2005—2010年，损失量比例增至54.8%，较2000—2005年增加了38.14%，城市扩张开始逐渐成为造成广东省NPP损失的主导因素。

为了深入理解城市扩张对NPP的影响，本文深入分析了2000—2010年广东省不同生态区非城市用地向城市用地转换引起的NPP损失（图4）。广东省不同生态区的NPP损失差异明显，2000—2005年，NPP损失最严重的区域为珠三角区，NPP损失量占同期全省NPP总损失量（非城市用地向城市用地转换造成的NPP总损失量）的68.4%，粤南区的NPP损失量最小；2005—2010年，粤中区成为NPP损失最严重的区域，占同期全省NPP总损失量的49.81%，珠三角区NPP损失量降低，南岭区和粤南区NPP损失量均有所增加，合占NPP总损失量的23.97%。城市化强度加剧使得具有较高生产力的植被被更多不透水地表侵占而造成NPP的损失，城市热岛、城市园林管理以及快速生长的外来树种的引入等却在一定程度上可能会增加城市植被的生长能力^[10,15]。珠三角区作为城市化程度较高的一个区域，NPP除了受城市扩张强度的影响，也受控于区域主导气候类型、城市热岛、城市园林管理及植被生产力较高的外来树种的引入等影响因素，使得2005—2010年NPP的损失低于2000—2005年NPP的损失。

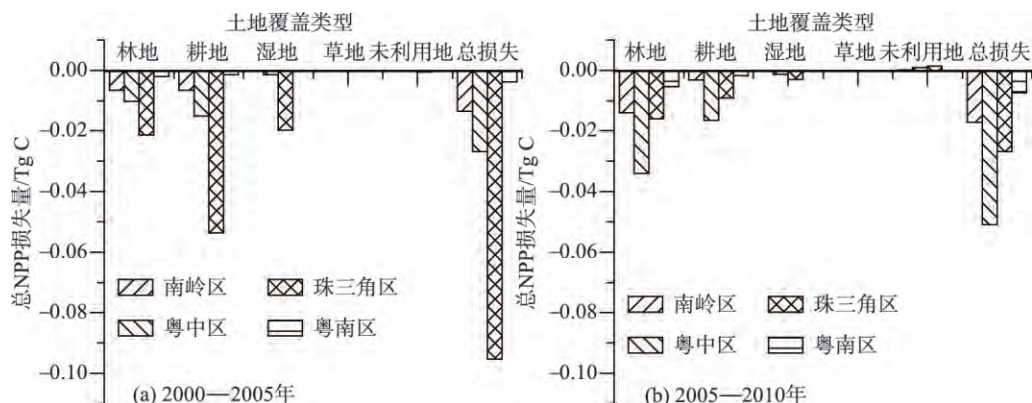


图4 2000—2010年广东省不同生态区非城市用地向城市用地转换引起的NPP损失

Fig. 4 The NPP loss caused by the conversion from non-urban lands to urban lands in different ecological regions of Guangdong Province during 2000—2010

4 结论与讨论

1) 广东省NPP空间分布不均, 形成一系列高值区和低值区, 存在显著的区域差异; 总体上是粤中区最高, 其次是粤南区 and 南岭区, 珠三角区最低。

2) 广东省LUCC程度整体上增强, 土地变化总面积由2000—2005年的2 643.75 km²增加到2005—2010年的3 140.51 km², 其中, 城市用地和耕地变化最大。不同生态区差异明显, 珠三角区和粤中区变化最大。2005—2010年, 珠三角区土地变化总面积略有降低, 主要归因于高度城市化使得土地发展向外围粤中区扩展, 其他生态区土地变化总面积均增加。

3) 在气候和地表覆盖共同作用下, 广东省土地覆盖类型转换引起的NPP增加量主要来自其他用地类型向林地的转换, NPP损失量主要来自林地和耕地向植被生产力较低的土地覆盖类型的转换, 尤其是被城市用地占用。以城市扩张为主导的土地覆盖类型变化整体上降低了广东省的NPP, 造成植被固碳能力的下降; 耕地作为城市扩张的主要来源, 其减少也必然会威胁到粮食危机和生态系统功能。不同生态区的NPP损失区域差异显著, 2000—2005年, NPP损失最严重的区域为珠三角区, 粤南区的NPP损失量最小; 2005—2010年, 粤中区成为NPP损失最严重的区域, 南岭区和粤南区NPP损失量有所增加, 珠三角区有所降低, 但仍显著高于南岭区和粤南区, 体现了城市扩张对NPP影响的复杂性。

根据光合作用和呼吸作用的反应方程式, 植物吸收1.62 g CO₂, 会产生1 g干物质碳, 并释放1.2 g O₂, 2000—2010年广东省由于土地覆盖类型转化共损失了1.05 Tg C, 相当于少吸收了1.7 Tg CO₂和少释放了1.26 Tg O₂, 这在碳固存中是一个极大的损失。本研究定量评估了气候变化条件下土地覆盖类型转化对NPP的影响, 为陆地生态系统碳收支和寻求城市的碳增长空间以及区域粮食安全提供科学参考。但也存在一些不足: NPP估算精度、土地覆盖与NPP的空间分辨率不一致, 未考虑气候因素和土地覆盖变化对NPP影响的相对贡献以及城市环境变化对NPP的影响等。在后续的研究中, 将定量评估气候因素和土地覆盖类型改变对NPP损失的相对贡献, 并以快速城市化的珠三角区作为

研究区,分析城市扩张对NPP的影响。

参考文献(References):

- [1] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, et al. Human domination of earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277(5325): 494-499.
- [2] ALBERTI M. The effects of urban patterns on ecosystem function [J]. *International Regional Science Review*, 2005, 28(2): 168-192.
- [3] DEFRIES R S, FIELD C B, FUNG I, et al. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(3): 803-815.
- [4] BURKE I C, KITTEL T G F, LAUENROTH W K, et al. Regional analysis of the Central Great Plains: Sensitivity to climate variability [J]. *BioScience*, 1991, 41(10): 685-692.
- [5] NIZEYIMANA E, PETERSEN G W, IMHOFF M L, et al. Assessing the impact of land conversion to urban use on soils with different productivity levels in the USA [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2): 391-402.
- [6] IMHOFF M L, BOUNOUA L, DEFRIES R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 434-443.
- [7] OKE T R, CROWTHER J M, MCNAUGHTON K G, et al. The micrometeorology of the urban forest [and discussion] [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1989, 324(1223): 335-349.
- [8] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [9] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424. [ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424.]
- [10] BUYANTUYEV A, WU J G. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(4): 512-520.
- [11] IMHOFF M L, TUCKER C J, LAWRENCE W T, et al. The use of multisource satellite and geospatial data to study the effect of urbanization on primary productivity in the United States [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2549-2556.
- [12] MILESIC, ELVIDGE C D, NEMANIRR, et al. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 401-410.
- [13] XU C, LIU M, AN S, et al. Assessing the impact of urbanization on regional net primary productivity in Jiangyin County, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 597-606.
- [14] YU D Y, SHAO H B, SHI P J, et al. How does the conversion of land cover to urban use affect net primary productivity? A case study in Shenzhen City, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 2054-2060.
- [15] LU D S, XU X F, TIAN H Q, et al. The effects of urbanization on net primary productivity in Southeastern China [J]. *Environmental Management*, 2010, 46(3): 404-410.
- [16] 邢白灵. 地表覆盖变化对南京市生态系统净初级生产力的影响 [D]. 南京: 南京大学, 2012. [XING B L. The Effects of Land Cover Change on Net Primary Productivity of Terrestrial Ecosystems in Nanjing City. Nanjing: Nanjing University, 2012.]
- [17] PEI F S, LI X, LIU X P, et al. Assessing the differences in net primary productivity between pre- and post-urban land development in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 4: 174-186.
- [18] 刘文超, 颜长珍, 秦元伟, 等. 近20 a陕北地区耕地变化及其对农田生产力的影响 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1375-1382. [LIU W C, YAN C Z, QIN Y W, et al. Cropland dynamics and its influence on the productivity in recent 20 years in northern Shanxi, China. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1375-1382.]
- [19] TIAN G J, QIAO Z. Assessing the impact of the urbanization process on net productivity in China in 1989-2000 [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 320-326.
- [20] MCDONNELL M J, PICHETTSTA, GROFFMAN P, et al. Ecosystem progress along an urban-to-rural gradient [J]. *Ur-*

- ban Ecosystems, 1997, 1(1): 21-36.
- [21] 冉有华, 李新. 中国植被功能型图(1公里) [DB/OL]. 兰州: 寒区旱区科学数据中心, 2011. doi:10.3972/westdc.001.2013.db. [RAN Y H, LI X. Plant functional types map in China. Lanzhou: Cold and Arid Regions Science Data Center, 2011. doi:10.3972/westdc.001.2013.db.]
- [22] 文晓航. 中国大陆太阳辐射及其与气象要素关系的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008. [WEN X H. A Study on Solar Radiation and Its Relation with Some Meteorological Elements in Chinese Mainland. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.]
- [23] 朱莉芬, 田永中, 岳天祥, 等. 基于1 km 栅格的地表太阳辐射模拟 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 16-19. [ZHU L F, TIAN Y Z, YUE T X, et al. Simulation of solar radiation on ground surfaces based on 1 km grid-cells. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 16-19.]
- [24] 廖顺宝, 李泽辉, 游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较 [J]. 资源科学, 2003, 25(6): 83-88. [LIAO S B, LI Z H, YOU S C. Comparison on methods for rasterization of air temperature data. Resources Science, 2003, 25(6): 83-88.]
- [25] 刘劲松, 陈辉, 杨彬云, 等. 河北省年均降水量插值方法比较 [J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3493-3500. [LIU J S, CHEN H, YANG S Y, et al. Comparison of interpolation methods on annual mean precipitation in Hebei Province. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3493-3500.]
- [26] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [27] 张新时. 植被的PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(二)——几种主要方法与PEP程序介绍 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(3): 197-207. [ZHANG X S. The potential evapotranspiration (PE) index for vegetation and vegetation-climatic classification (2)—An introduction of main methods and PEP program. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1989, 13(3): 197-207.]
- [28] 周广胜, 张新时. 中国气候—植被关系初探 [J]. 植物生态学报, 1996, 20(2): 113-119. [ZHOU G S, ZHANG X S. Study on Chinese climate-vegetation relationship. Acta Phytocologica Sinica, 1996, 20(2): 113-119.]
- [29] NI J, ZHANG X S, SCURLOCK J M O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests [J]. Annals of Forest Science, 2001, 58: 351-384.
- [30] ZHU W Q, PAN Y Z, HE H, et al. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(4): 457-463.
- [31] 康婷婷, 高苹, 居为民, 等. 江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因子 [J]. 生态学报, 2014, 34(2): 410-420. [KANG T T, GAO P, JU W M, et al. The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of croplands in Jiangsu Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 410-420.]
- [32] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608. [PIAO S L, FANG J Y, GUO Q H. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net Primary Productivity. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(5): 603-608.]
- [33] 刘明亮. 中国土地利用/土地覆盖变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2001. [LIU M L. Land-use/Land-cover Change and Terrestrial Ecosystem Phytomass Carbon Pool and Production in China. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, CAS, 2001.]
- [34] 陶波. 中国陆地生态系统净初级生产力与净生态系统生产力模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003. [TAO B. Modeling Research on Terrestrial Net Primary Productivity & Net Ecosystem Productivity in China. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2003.]
- [35] 刘海桂, 唐旭利, 周国逸, 等. 1981—2000年广东省净初级生产力的时空格局 [J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4065-4074. [LIU H G, TANG X L, ZHOU G Y, et al. Spatial and temporal patterns of Net Primary Productivity in the duration of 1981-2000 in Guangdong, China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4065-4074.]
- [36] 蔡睿, 徐瑞松, 陈彧, 等. 广东省植被NPP时空特征变化分析 [J]. 农机化研究, 2009(2): 9-16. [CAI R, XU R S, CHEN Y, et al. Analysis of temporal spatial characteristics of vegetation NPP in Guangdong Province. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(2): 9-16.]
- [37] 罗艳, 王春林. 基于MODIS NDVI的广东省陆地生态系统净初级生产力估算 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1467-1471. [LUO Y, WANG C L. Valuation of the net primary production of terrestrial ecosystems in Guangdong Province based on remote sensing. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1467-1471.]

- [38] 樊江文, 钟华平, 梁颺, 等. 草地生态系统碳储量及其影响因素 [J]. 中国草地, 2003, 25(6): 51-58. [FAN J W, ZHONG H P, LIANG B, et al. Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors. Grassland of China, 2003, 25(6): 51-58.]
- [39] MICHALETZS T, CHENG D L, KERKHOFFA J, et al. Convergence of terrestrial plant production across global climate gradients [J]. Nature, 2014, 512(7512): 39-43.

Analyzing the Effects of Land Cover Change on Vegetation Net Primary Productivity in Guangdong Province

JIANG Chun^{1,3,4}, WU Zhi-feng², CHENG Jiong³, QIAN Le-xiang²

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China; 2. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control, Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It's of significant importance to understand the effect of LUCC on vegetation net primary productivity (NPP) in global carbon cycle and food security. This study aimed to investigate how the land cover change caused by urban expansion affects the regional NPP in Guangdong Province. The vegetation type data, land cover data, moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) normalized difference vegetation index (NDVI) and meteorological data were combined to simulate the spatial distribution of NPP in the year 2000, 2005 and 2010 in Guangdong Province by using the improved Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model. Guangdong Province is divided into four ecological regions: Nanling region, Yuezhong region, the Pearl River Delta and Yuenan region. Then, the spatial pattern of NPP and spatio-temporal dynamics of land cover change were analyzed, and the regional differences of NPP gains/losses caused by land cover change were compared. The results show that: 1) The NPP is heterogeneous in space and forms a series of zones with high value and low value; the Yuezhong region has the highest annual mean NPP, and the lowest NPP value is in the Pearl River Delta. 2) The change of land cover in Guangdong Province increased during 2000–2010, with the maximum changes happening in urban land and cropland, and the Pearl River Delta and Yuezhong region had the most change. 3) Under the condition of climate change, the land cover change resulting from urban expansion caused the overall NPP loss in Guangdong Province; the primary loss is caused by the conversion from croplands and forests to land covers with low productivity, especially the urban land. The NPP losses in different ecological regions are greatly different, the Pearl River Delta and Yuezhong region having more serious NPP loss during 2000–2005, and with a decrease of NPP loss in the Pearl River Delta and increases in other ecological regions during 2005–2010, which indicates that the effects of urban expansion on NPP are complex.

Key words: land use/cover change; urban expansion; net primary productivity (NPP); CASA; Guangdong Province